第 40 卷 第 5 期
2023 年 10 月

应 用 力 学 学 报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 5
Oct. 2023

文章编号:1000-4939(2023)05-1194-10

表面活性剂溶液中弹性胶束断裂作用下圆柱绕流特征研究

苏晓辉[1],徐志锋[1],金辉[2],王治国[1],刘佳伦[1],吴松[3]

(1. 西安石油大学新能源学院,710065 西安;2. 西安交通大学动力工程及多相流国家重点实验室,710049 西安;
3. 西安石油大学机械工程学院,710065 西安)

摘 要:表面活性剂分子溶于水自组装形成的蠕虫状胶束溶液由于其高表面活性和高黏弹性,具有独特的力学响应特性,呈现出与牛顿流体迥异的流动特征。采用考虑溶液中胶束可逆断裂和重构效应的双组分 VCM 本构方程,研究了溶液流变学特性,发现溶液拉伸应力随应变率呈现出拉伸硬化-稀化-硬化的强非线性特征。研究了蠕虫状胶束溶液绕圆柱流动的特性,在低雷诺数($Re\sim 0.01$)下,当维森贝格数 $Wi>1$ 时,流场出现较强的不稳定性,绕流尾迹区流场呈现随时间波动的特征,通过功率谱分析发现流场波动具有拟周期特征,当胶束断裂引起流体拉伸应力对弹性响应的非线性增强时,流场波动的不规则性增强。圆柱后缘附近出现一对周期性变化的对称涡,表明流体弹性会促进流动分离的发生,流体拉伸应力对弹性变化的强非线性响应是造成低雷诺数绕流流动不稳定性的根本原因,揭示了蠕虫状胶束溶液在低雷诺数高黏弹性时绕流流动不稳定性的产生机理。

关键词:表面活性剂;蠕虫状胶束溶液;VCM 模型;流动不稳定性;黏弹性流体

中图分类号:O373 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.026

Study on the flow around a circular cylinder under the elastic micelle scission in surfactant solutions

SU Xiaohui[1], XU Zhifeng[1], JIN Hui[2], WANG Zhiguo[1], LIU Jialun[1], WU Song[3]

(1. College of New Energy, Xi'an Shiyou University, 710065 Xi'an, China;
2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering (SKLMF), Xi'an Jiaotong University, 710049 Xi'an, China;
3. College of Mechanical Engineering, Xi'an Shiyou University, 710065 Xi'an, China)

Abstract: Wormlike micellar fluids formed by dissolving surfactants in water have unique mechanical responses due to its high surfactivity and strong viscoelasticity. These properties enable wormlike micellar fluids rich and complicated flow behaviors. By considering the breakage of long chains and the reforming of short chains, a two species VCM model is introduced in this study to numerically investigate the effect of the chain scission on the flow instability. First, the rheological properties are obtained by directly solving

收稿日期:2022-04-22 **修回日期**:2022-10-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51906202;52074220);陕西省自然科学基金资助项目(No. 2019JQ-814);西安石油大学研究生创新与实践能力培养计划项目(No. YCS21213235)
通信作者:苏晓辉。E-mail:xhsu@xsyu.edu.cn
引用格式:苏晓辉,徐志锋,金辉,等. 表面活性剂溶液中弹性胶束断裂作用下圆柱绕流特征研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1194-1203.
SU Xiaohui, XU Zhifeng, JIN Hui, et al. Study on the flow around a circular cylinder under the elastic micelle scission in surfactant solutions [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1194-1203.

the VCM constitutive equation set numerically. The fluid exhibits a strong nonlinear thickening-thinning-thickening phenomenon under the uniaxial tension. The flow passing by a confined cylinder is investigated. The flow becomes significantly unstable at very low Reynolds numbers ($Re \sim 0.01$) when the Weissenberg number is larger than 1. The fluid velocity in the downstream wake of the cylinder presents a fluctuation with the time. The flow fluctuation is quasi-periodic according to the power spectrum analysis. The flow fluctuation becomes more irregular when the nonlinearity of the variation of the tension stress with the elasticity becomes stronger. A pair of symmetrical vortexes behind the cylinder changing with time are also observed, indicating that the elasticity promotes the flow separation on the cylinder surface. The flow instability is due to the strong nonlinear response of the tension stress within the bulk fluid to the elasticity of the fluid.

Key words: surfactant; wormlike micellar solution; VCM model; flow instability; viscoelastic fluid

表面活性剂分子的水溶液在激活剂作用下自组装形成具有一定长度(可达几个微米)、能够自由弯曲和拉伸的柔性聚集体,又称蠕虫状胶束,当水中表面活性剂浓度大于交叠浓度时,蠕虫状胶束交叠缠绕形成三维的空间网络结构,具有显著的黏弹性和丰富的流动现象,广泛应用于提高油气采收率[1-4]、强化传热[5]、减阻[5-6]、生物医药[4,7]、环境修复和日用化工[7],近年来成为石油、化工和新材料的研究热点[8]。

蠕虫状胶束溶液兼具流体的黏性和固体的弹性,与高分子聚合物溶液中胶束的强共价骨架连接方式不同,蠕虫状胶束溶液中胶束会发生持续可逆的断裂和重构[9-11],因此又称"活性聚合物",其流变性质较一般聚合物溶液更为复杂,如在大变形的剪切和拉伸下胶束会加速断裂[7,12]。

目前对蠕虫状表面活性剂溶液的研究主要集中在其流变学性质,如在稳态或非稳态剪切和拉伸作用下的应力-应变率响应特性[9,12-16]和表面活性剂溶液的化学组成对其自组装形貌及溶液流变性质的影响[4,17]。在实际流动中,流体经常处于复杂几何和变形的共同作用下,呈现出丰富的流动现象,如剪切诱导结构,低雷诺数绕流过程中被绕流物体前后的流动非稳态行为[18-24],颗粒在溶液中沉降速度的随机脉动等[3,7,15,25-26]。但是目前对于上述流动现象及其机理均认识不足,对流动状态难以预测,甚至不能定性预测。

流体绕圆柱流动由于同时伴随非均匀剪切以及拉伸变形而呈现丰富的流动状态,因此常常作为一个基准问题研究流动问题,其用于研究复杂流体时比单纯均匀剪切和拉伸流动能更多地反映流体流变学性质[18,20-21]。对蠕虫状胶束流体的圆柱绕流实验发现,即使在很低雷诺数下,当弹性较强时,绕圆柱流动过程中产生显著的流动不稳定[9,20-21],说明流体黏弹性会显著影响流体动力学特性。

目前对于复杂黏弹性流体绕流数值模拟研究大多基于 Maxwell 流体,如 Oldroyd-B 以及考虑剪切稀化效应的 GIESEKUS[8,27]、FENE 本构模型[28-35],这类流体在描述聚合物溶液时适用性较好,但是对于表面活性剂形成的蠕虫状胶束活性大分子,难以描述缠结胶束链在剪切和拉伸作用下的断裂作用,采用以上本构方程对蠕虫状胶束流体的很多流动现象难以预测,如难以解释实验中颗粒在蠕虫状胶束溶液中沉降速度连续不稳定脉动现象。VASQUEZ 等[11,36-37]基于 Cates 的"活性聚合物"理论提出双组分 VCM 模型,考虑流体变形过程中胶束的可逆断裂和重构作用,能够更真实地描述蠕虫状表面活性剂溶液的流变性质,模型能够更准确地描述流动现象。

本研究拟采用双组分 VCM 本构模型描述蠕虫状胶束溶液的流变性质,研究其绕圆柱流动时的流动状态,流体流变参数对流动状态以及流动不稳定性的影响,以期为认识上述复杂流动现象提供理论解释,为工程问题中复杂流体流动设计和优化提供理论基础。

1　数学模型和数值模拟方法

蠕虫状胶束溶液为不可压缩流体,假定流动为绝热状态。流体中除了溶剂的黏性应力外,溶质中胶束的黏弹性产生一个附加的应力项,附加的应力项采用双组分 VCM 黏弹性本构方程。

1.1　流动控制方程

连续方程

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u}\right) = \nabla\left(-p\boldsymbol{I} + \mu_S(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T) + \boldsymbol{\tau}\right) \tag{2}$$

式中：ρ 是流体密度；$\boldsymbol{u}$ 是速度矢量；t 是时间；μ_S 为溶剂黏度；$\boldsymbol{\tau}$ 为溶质产生的附加黏弹性应力，需要引入额外的方程进行封闭，此处溶质的黏弹性采用双组分 VCM 模型描述。

流体为表面活性蠕虫状胶束溶液，微观尺度的胶束链在不可压缩牛顿流体的溶剂中均匀分布，并且相互缠结形成活性的空间网络结构，网络中的链在流动过程中可以变形、断裂以及重构，这一效应通过引入双组分 VCM 本构模型进行模化。活性网络中的弹性链产生的附加黏弹性应力通过引入长链组分 A 和短链组分 B 的数量密度和构象张量求解，表达式为

$$\boldsymbol{\tau} = G_0[(\boldsymbol{A} + 2\boldsymbol{B}) - (n_A + n_B)\boldsymbol{I}] \tag{3}$$

式中：G_0 为胶束弹性模量；n_A 和 $\boldsymbol{A}$ 分别为长链组分 A 的数量密度和构象张量；n_B 和 $\boldsymbol{B}$ 分别为短链组分 B 的数量密度和构象张量；$\boldsymbol{I}$ 为单位张量。

VCM 模型假定在流体流动过程中，拉伸变形时一个长度为 L 的链 A 可以断裂形成两个长度相等的长度为 $L/2$ 的短链 B，松弛后两个短链 B 可以重构形成一个长链 A，其断裂和重构的速率由链断裂和重构反应动力学考虑，组分 A 和 B 的数量密度输运方程为

$$\frac{\partial n_A}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla n_A = 2D_A \nabla^2 n_A + \frac{1}{2\lambda_A} c_B n_B^2 - \frac{c_A n_A}{\lambda_A} \tag{4}$$

$$\frac{\partial n_B}{\partial t} + \boldsymbol{u} \cdot \nabla n_B = 2D_B \nabla^2 n_B - \frac{c_B n_B^2}{\lambda_A} + 2\frac{c_A n_A}{\lambda_A} \tag{5}$$

式中：D_A 和 D_B 分别为长链 A 和短链 B 的扩散系数；λ_A 为长链 A 的松弛时间；c_A 和 c_B 分别为链 A 和 B 的断裂和重构速率。

长链 A 断裂形成两个短链 B 的速率根据当地应变率、胶束构象张量和数量密度确定，即

$$c_A = c_{A_{Eq}} + \frac{\xi\mu}{3}\left(\dot{\gamma} : \frac{\boldsymbol{A}}{n_A}\right) \tag{6}$$

式中：$c_{A_{Eq}}$ 为平衡时的长链 A 的断裂速率，$\mu = 1 + c_{A_{Eq}}$；$\dot{\gamma}$ 为速度梯度张量，胶束断裂因子 ξ 表征长胶束链 A 断裂的非线性效应大小。两个短链 B 重构形成长链 A 的速率假定为常数，等于平衡态重构速率 $c_B = c_{B_{Eq}}$。

两种链的构象张量方程分别为

$$\lambda_A \overset{\nabla}{\boldsymbol{A}} + \boldsymbol{A} - n_A\boldsymbol{I} - \lambda_A D_A \nabla^2 \boldsymbol{A} = c_B n_B \boldsymbol{B} - c_A \boldsymbol{A} \tag{7}$$

$$\varepsilon\lambda_A \overset{\nabla}{\boldsymbol{B}} + \boldsymbol{B} - \frac{n_B}{2}\boldsymbol{I} - \varepsilon\lambda_A D_B \nabla^2 \boldsymbol{B} = -2\varepsilon c_B n_B \boldsymbol{B} + 2\varepsilon c_A \boldsymbol{A} \tag{8}$$

式中，$\varepsilon = \lambda_A/\lambda_B$，$\lambda_B$ 为短链 B 的松弛时间。

无量纲参数雷诺数 Re 和魏森贝格数 Wi 分别定义为

$$Re = \frac{\rho d U}{\mu_0} \tag{9}$$

$$Wi = \frac{\lambda_{eff} U_{in}}{d} \tag{10}$$

$$\lambda_{eff} = \frac{\lambda_A}{1 + C_{A_{Eq}}} \tag{11}$$

式中：U_{in} 为均匀来流的速度大小；Wi 表示的是弹性与黏性的相对大小；λ_{eff} 为流体有效松弛时间。

1.2 数值模拟方法

研究对象为低雷诺数（$Re \sim 10^{-2}$）时蠕虫状胶束溶液在高为 H 的通道内绕直径为 d 的圆柱的流动特性，如图 1 所示。考虑不同的通道阻塞比 BR（BR = d/H），通道入口段和出口段的长度分别为 $40d$ 和 $60d$，保证流体在绕流前后达到充分发展和松弛状态。对计算域采用结构化网格，对于圆柱表面速度和应力梯度较大的区域进行加密，尾迹区流体由于剪切和拉伸作用较强，对其进行加密，如图 1 所示。

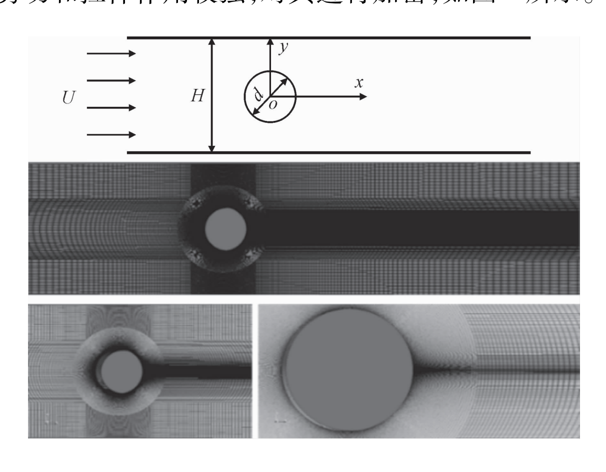


图 1 计算域及网格

Fig. 1 The computational domain and grid

采用 OpenFOAM 开源软件进行求解，守恒方程和本构方程的扩散项和梯度项均采用中心差分格式，为了提高迭代收敛性，所有对流项均采用 CUBISTA（convergent and universally bounded interpo-

lation scheme for treatment of advection）离散方法，速度压力耦合采用 SIMPLE 算法。

流动控制方程边界条件为：在圆柱和通道壁面处，速度采用无滑移边界 $\boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}(0,0,0)$，压力采用零梯度条件 $\nabla p=0$；通道入口处采用速度入口 $\boldsymbol{u}=\boldsymbol{u}(U_{\mathrm{in}},0,0)$，压力采用零梯度条件 $\nabla p=0$；通道出口处采用压力出口条件 $p=p_{\mathrm{out}}$，速度梯度为 0。

对 VCM 本构方程，根据文献［11］，边界条件为：圆柱和通道壁面处，胶束构象张量和胶束数量密度均采用无通量边界 $\boldsymbol{n}\cdot\nabla\phi=0$（$\phi$ 代表构象张量分量和胶束数量密度）；通道入口处，胶束数量密度 $n_{\mathrm{A}}=1$，$n_{\mathrm{B}}=\sqrt{2C_{\mathrm{A_{Eq}}}/C_{\mathrm{B_{Eq}}}}=1.93$，构象张量 $\boldsymbol{A}=(1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1)$，$\boldsymbol{B}=(n_{\mathrm{B}}/2\ 0\ 0\ n_{\mathrm{B}}/2\ 0\ n_{\mathrm{B}}/2)$；通道出口处，胶束数量密度和构象张量均采用无通量边界 $\boldsymbol{n}\cdot\nabla\phi=0$。

在圆柱壁面和整个计算域采用不同单元数量的网格进行网格无关性验证，经验证计算域具有 69 000个四边形单元的网格（圆柱表面网格数量为 360，网格尺寸为 0.008 72）可以很好地捕捉圆柱壁面附近及整个计算域内的流动特征，进一步加密网格对计算结果影响可以忽略不计。为保证 Courant 数小于 0.1 和计算收敛，取计算时间步长 $\Delta t=5\times10^{-5}$s，胶束构象张量分量和数量密度初始值均取通道入口边界值。蠕虫状胶束流体不仅在剪切变形条件下表现出稀化，而且在拉伸变形中表现出拉伸硬化-稀化效应，因此选取参数必须能够同时反应这两种流变特性，选取的流变参数为 $\beta=\mu_{\mathrm{S}}/\mu_0=0.26$，$\mu=2.6$，$\varepsilon=0.005$，$n_{\mathrm{B}}^0=1.93$。

2　结果和讨论

2.1　VCM 流体流变性质

为了研究 VCM 流体流变性质，分别考虑流体在均匀平面剪切流动和单轴拉伸流动下的应力响应特性。考虑到 VCM 本构方程自身的非线性，难以获得解析解，可通过给定剪切和拉伸变形率，然后直接数值求解双组分 VCM 本构方程（3）～（8）获得流变曲线，结果分别如图 2～图 3 所示。

均匀剪切变形时流变曲线如图 2 所示。横坐标 $Wi=\lambda_{\mathrm{eff}}\dot{\gamma}$，$\dot{\gamma}$ 为剪切速率，有效松弛时间 λ_{eff} 根据式（11）求得为 0.38 s。图 2（a）和图 2（b）纵坐标分别为无量纲剪切应力 τ_{XY} 和剪切黏度 η。可以看出，VCM 模型可以描述溶液的剪切稀化效应和剪切带，这与 Giesekus 本构模型[8]剪切性质类似，此外，随着胶束断裂指数 χ（$\chi=\xi\cdot\mu$）逐渐减小，剪切带对应的剪切速率逐渐后移，当 χ 减小至零时，与 Oldroyd-B 本构模型的剪切流变曲线一致，剪切稀化效应消失。胶束断裂指数 χ 反映流体剪切应力随弹性大小变化的非线性强弱程度，χ 越小，剪切应力随弹性越接近于线性变化。

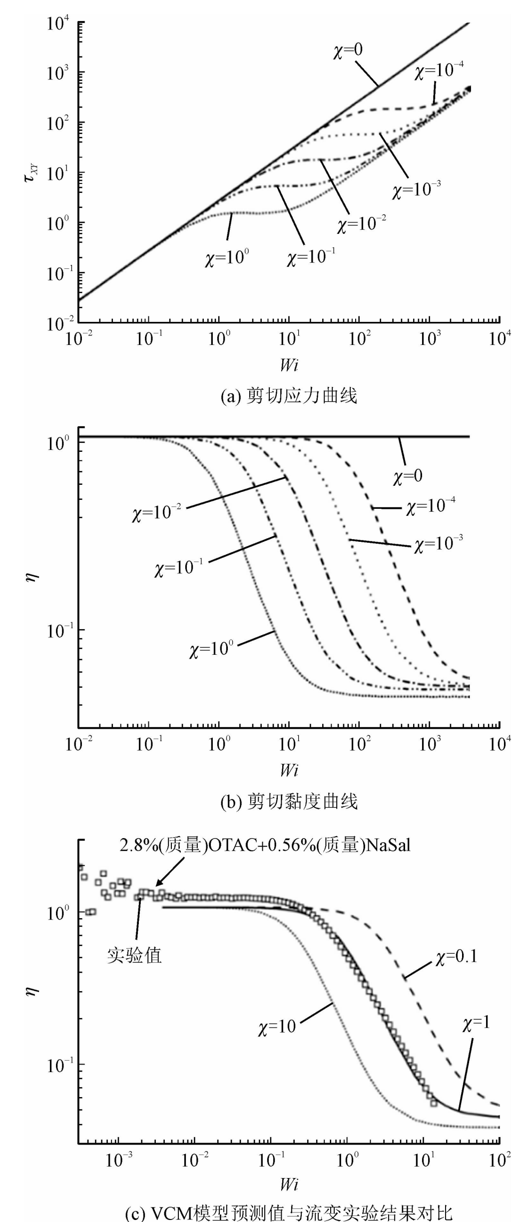


图 2　VCM 流体在平面剪切变形下的流变曲线（$Wi=\lambda_{\mathrm{eff}}\dot{\gamma}$）

Fig. 2　The rheological properties for VCM fluids under the planar shear deformation（$Wi=\lambda_{\mathrm{eff}}\dot{\gamma}$）

采用控制应力流变仪（HAKKE-RS300）对表面活性剂溶液（2.8wt% OTAC 和 0.56wt% NaSal）的

线性黏弹性和稳态流变进行实验研究，结果如图2(c)所示。溶液松弛时间 $\lambda = 0.27$ s，零剪切黏度 $\mu_0 = 1.944$ Pa·s，采用VCM本构模型对实验数据进行参数拟合，拟合结果如图2(c)所示。结果表明胶束断裂指数χ为1时稳态剪切黏度的VCM模型预测值跟实验结果吻合较好。

单轴拉伸变形时流体流变曲线如图3所示，横坐标 $Wi_E = \lambda_{eff}\dot{\varepsilon}$，$\dot{\varepsilon}$ 为拉伸速率，图3(a)和图3(b)纵坐标分别为无量纲拉伸应力 τ_{YY} 和拉伸黏度 η_E。可以看出拉伸应力随着拉伸速率的增加呈现很强的非线性，呈现拉伸硬化-稀化-硬化的特征，不同于Giesekus流体只出现拉伸硬化的情况[8]；胶束断裂指数χ同样反映拉伸应力随弹性变化的非线性效应，χ越小，拉伸应力随弹性变化的非线性越强，随着χ增大，拉伸应力随弹性变化非线性逐渐减弱。因此，维森贝格数表征弹性大小，而胶束断裂指数表征流体应力随弹性变化的非线性强弱程度。

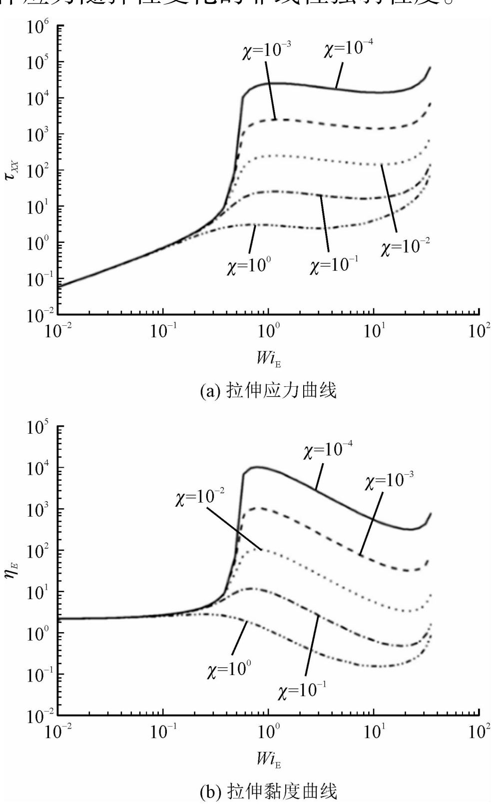


图3 VCM流体单轴拉伸变形下的流变曲线($Wi_E = \lambda_{eff}\dot{\varepsilon}$)

Fig. 3 The rheological properties for VCM fluids under the uniaxial tension deformation ($Wi_E = \lambda_{eff}\dot{\varepsilon}$)

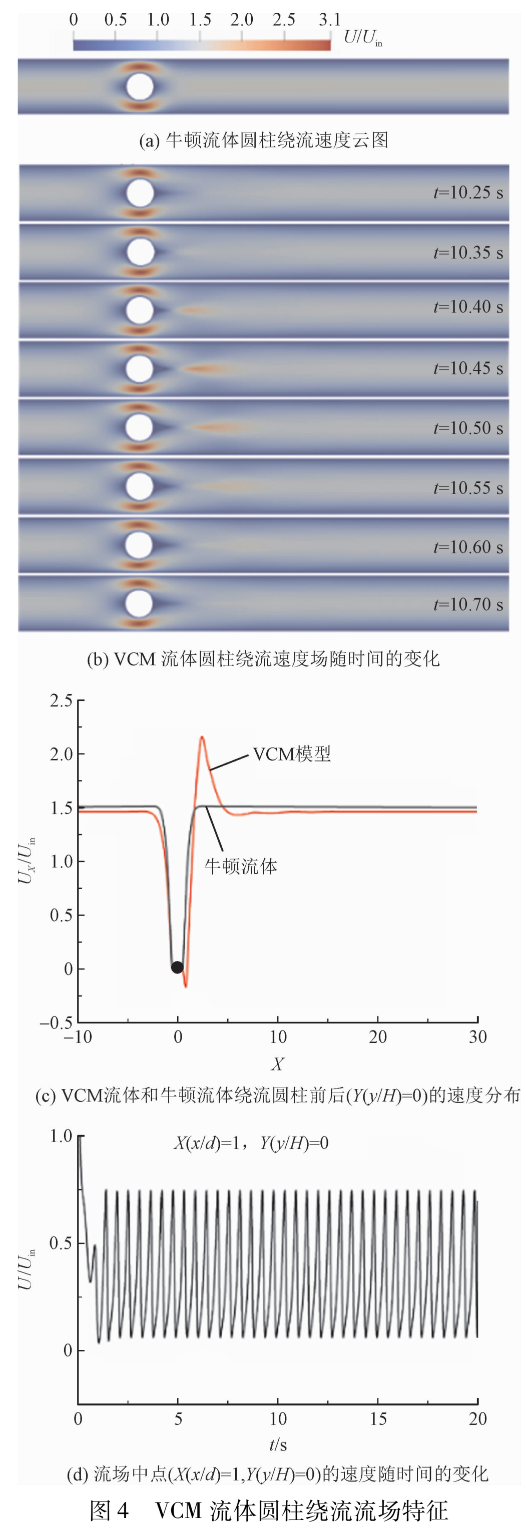
2.2 VCM流体圆柱绕流流动特性

通过对蠕虫状胶束溶液圆柱绕流的流场特征研究，发现在低雷诺数($Re \sim 10^{-2}$)、$Wi > 1$ 时尾迹区速度场出现显著的不稳定性，如图4(b)所示，而低雷诺数下牛顿流体圆柱绕流流场呈稳态状态(图4a)，此外采用其他黏弹性本构方程如Oldroyd-B、Giesekus模型时[29,31-32,35]预测的流场也呈稳态流动，说明流体弹性并不必然导致流动的不稳定。图4(c)为 $t = 10.45$ s 时圆柱前后对称轴上无量纲速度分布。可以看出，牛顿流体绕流前后速度分布关于圆柱中心对称，而VCM流体绕圆柱流动前后速度分布在圆柱上游与牛顿流体类似，而在圆柱后缘附近很小的一个区域内速度出现了一个负值，即流体出现与来流相反的负速度，形成负尾迹，这与采用Giesekus模型研究结果[27]类似，负尾迹是弹性和剪切稀化共同作用形成。

为了获得颗粒下游速度定量变化规律，取流场中 $X(x/d) = 1$，$Y(y/H) = 0$ 点的速度随时间的变化，如图4(d)所示，可以看出，此处速度大小随时间的变化呈现近于周期性的波动规律。对得到的速度波动信号提取其功率谱。图5(a)和(b)所示分别为不同 Wi 时速度变化时间谱和功率谱，可以看出，当 $Wi = 1$ 时，速度随时间并不发生变化，而当 Wi 增加至2时，速度随时间呈现较强的波动性，其无量纲速度波动幅度在0.05～0.75。由图5(b)的功率谱可以看出，速度波动是由数个不同频率，不同能量的波动信号叠加而成，有一个起主导作用的主频信号，主频较低，信号频率越高，幅度越小，说明速度在以一个主频波动过程中还有比较小的信号的扰动，因此绕流流场速度的波动是一种拟周期波动。当 Wi 增大至3时，波动幅度整体减小，低频和次低频信号的频率均增加，因此波动幅度较大时，频率较小，波动幅度较小时，频率较大；当 Wi 增大至4以上时，速度波动消失，说明流场的不稳定只存在于中等 Wi 数的情况，当弹性过小或过大时，即完全黏性主导或者完全弹性主导时，均不会出现流动的不稳定。

对胶束断裂指数χ对速度波动的影响进行了研究，如图5(c)～5(d)所示。发现χ减小，速度波动增强，波动信号的频率数增加，并且次级频率的波动幅度增大，即波动信号的随机性增强；但是当χ进一步减小时，由流变性质可知，VCM模型逐渐变得与UCM接近，难以获得收敛解，可以推断速度波动随着χ进一步减小呈现较强的随机效应，这与ZHANG等[15]在实验中观察到的颗粒沉降速度变化特征定性上吻合。对于球非稳态沉降问题，可以推断是由流体拉伸应力对弹性变化响应的强非线性效应

引起。



(a) 牛顿流体圆柱绕流速度云图

(b) VCM 流体圆柱绕流速度场随时间的变化

(c) VCM流体和牛顿流体绕流圆柱前后(Y(y/H)=0)的速度分布

(d) 流场中点(X(x/d)=1,Y(y/H)=0)的速度随时间的变化

图 4　VCM 流体圆柱绕流流场特征

($Re\sim10^{-2}$,BR = 0.5,χ = 0.01,Wi = 2)

Fig. 4　The flow field of VCM fluids flowing around a circular cylinder ($Re\sim10^{-2}$,BR = 0.5,χ = 0.01,Wi = 2)

造成上述现象的原因是当 Wi 在 1 以下时,流体黏性起主导作用,其应力分布与在牛顿流体中分布特征一致(图 6c);而当 $Wi>1$ 时,弹性作用增强,应力整体增大,绕流时圆柱周围和尾迹区剪切和拉伸速率在空间分布不均匀,由 $Wi=\lambda_{\mathrm{eff}}\dot{\gamma}$ 可知绕流时流场不同位置处的弹性大小不同,大应变率区域弹性更强,而由流变曲线图 3 可知,拉伸应力随着弹性大小变化极不均匀,导致应力在空间上的分布不均匀,随时间变化趋势不一致,产生流动不稳定。而当 Wi 较大时,弹性起主导作用,避开了应力随弹性变化的强非线性区,因此应力变化比较平滑,不会产生流动不稳定现象。

此外研究了不同的弹性和壁面约束下的主应力差 PSD 和长链数量密度 n_A 的变化。主应力差 PSD 定义为 $\Delta\sigma=\sqrt{(\tau_{xx}-\tau_{yy})^2+4\tau_{xy}^2}$,可以描述胶束在空间的取向和伸展情况,与流动双折射率之差具有 $\Delta\sigma=\Delta n/C$ 的线性关系,C 为应力光学常数。图 6(a)为圆柱绕流的流动双折射实验结果,图 6(b)为 $Wi=2$ 时主应力差的模拟值,可以看出,模拟结果能够较好地反映出绕流过程中圆柱周围胶束的向列结构分布特性和应力特征,这与 SUN 等[22]在实验中观测到的圆柱后缘处的三角区域吻合较好。由图 6(f)、图 6(i)看出,BR 很小,即壁面效应很弱时,在圆柱前缘处 PSD 最大,尾迹区较小,同样弹性(Wi 相等)时,不发生速度场的不稳定,这是因为尾迹区应力值大大减小,不会诱发流动的不稳定。

此外通过对圆柱绕流后的流场研究,发现在雷诺数 $Re\sim0.01$ 时,绕流尾迹区出现一对上下对称的涡(图 7),流体在圆柱表面发生流动分离,并且涡的形态和大小以流场波动的主频率作周期性变化。沿着圆柱后缘应力值较低的三角区域内出现一对扁平的涡,随着时间增加,涡沿着流动方向被拉长,然后又缩短恢复至初始的扁平状。流体之所以在低雷诺数绕流时会从圆柱表面脱落,是因为在圆柱上下表面和尾迹区内,流体剪切和拉伸变形较大,长胶束和短胶束均处于伸长状态,圆柱表面薄层内的向列结构的胶束向下游的过程中为保证拉伸状态,不会达到后驻点,而是倾向于提前从圆柱表面脱落进入尾迹区,进入尾迹区的部分短链由于拉伸作用减小会重新结合成长链(图 6g),圆柱后方的三角区域边缘附近长链数量密度 n_A 明显增加,重构后的长链松弛后回缩，重新回到自由缠结状态，此区域内流体流动速度小，部分流体卷入到圆柱后方的滞止点附近，形成一对上下对称的涡，因此涡的形成是胶束拉伸形成向列结构及尾迹区胶束的强拉伸共同作用导致。

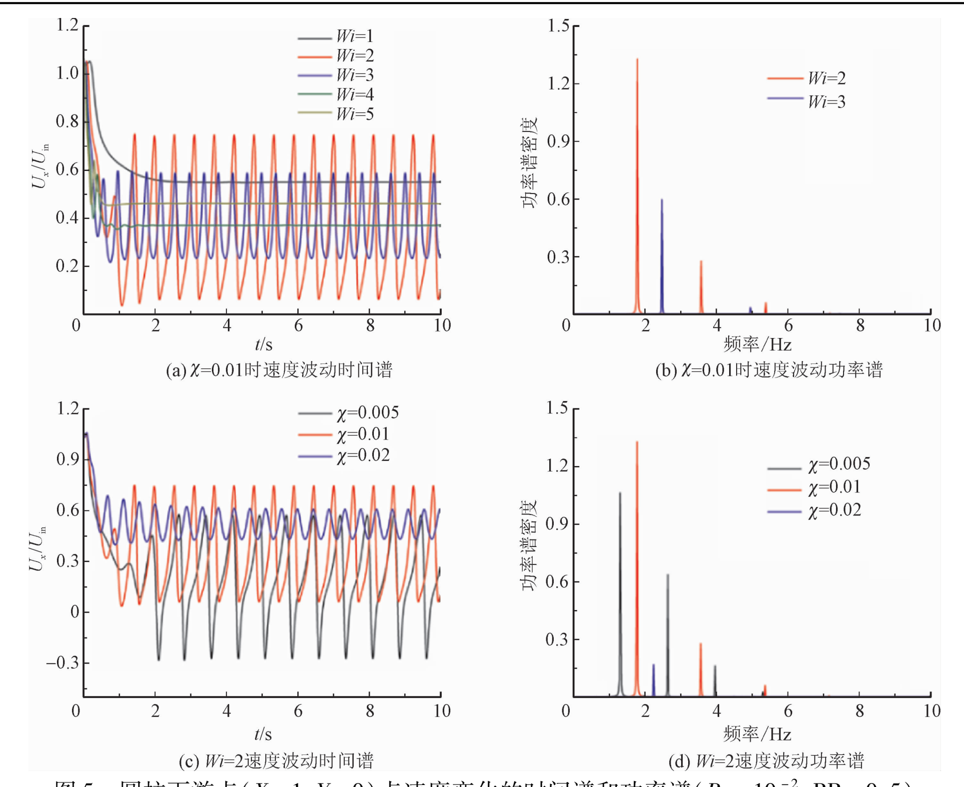


图 5 圆柱下游点($X=1,Y=0$)点速度变化的时间谱和功率谱($Re\sim10^{-2}$,BR =0.5)

Fig. 5 The time spectrum and power spectrum of the velocity with the time at point ($X=1,Y=0$) behind the cylinder ($Re\sim10^{-2}$,BR =0.5)

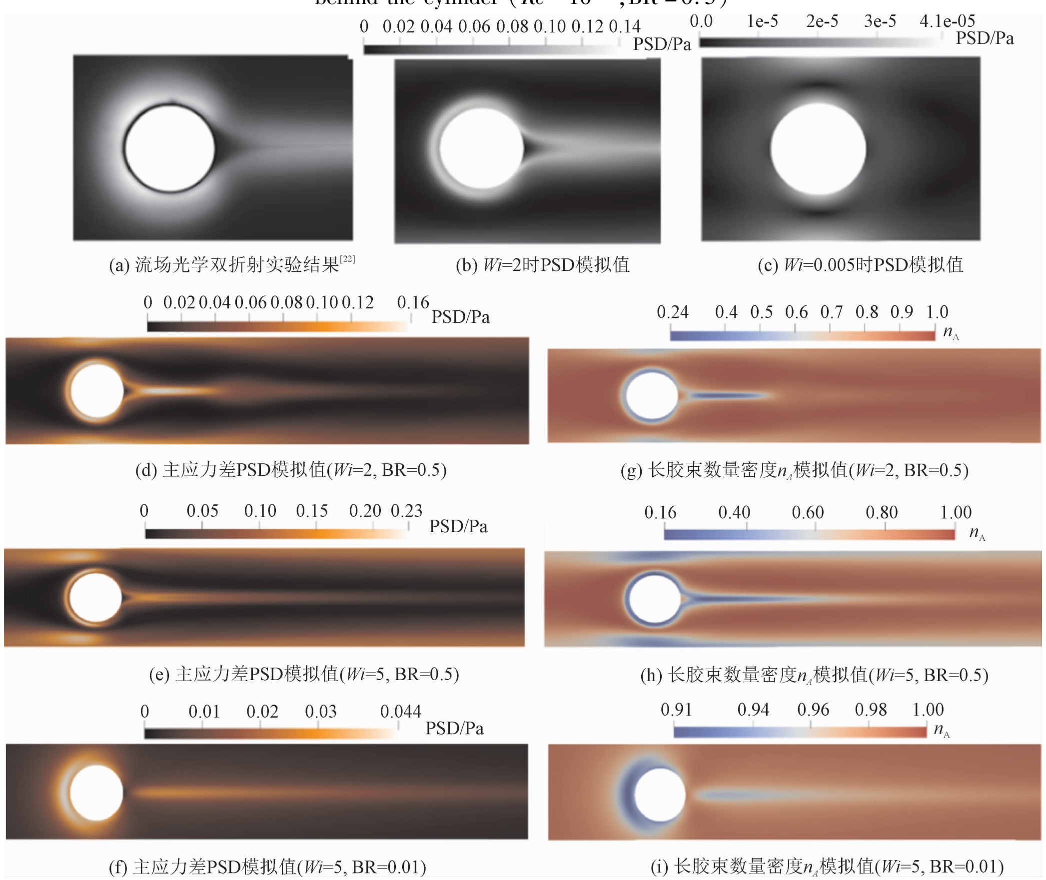


图 6 绕流流体中主应力差(PSD)和长胶束数量密度分布($\chi=0.01,Re\sim10^{-2}$)

Fig. 6 The principal stress difference and the number density of the long micelle within the fluids ($\chi=0.01,Re\sim10^{-2}$)

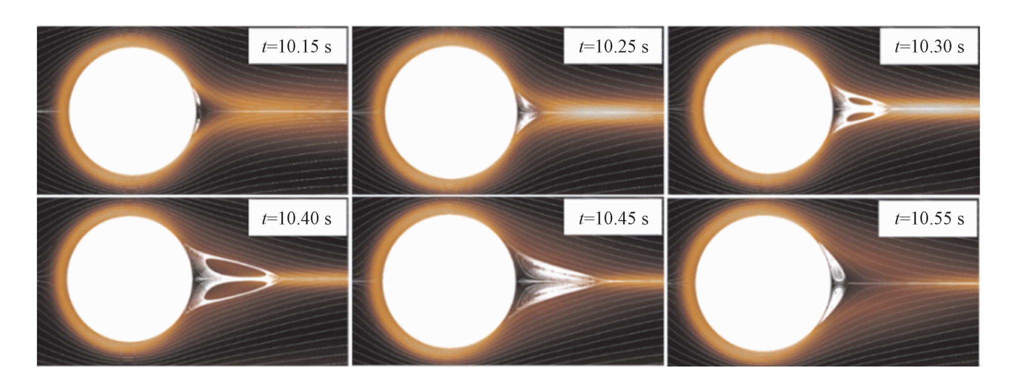


图 7　绕流尾迹区随时间变化的对称涡($\chi=0.005$,BR $=0.5$)

Fig. 7　The symmetrical vortex changing with time in the wake region ($\chi=0.005$,BR $=0.5$)

在牛顿流体中,当雷诺数小于 0.5 时,绕流圆柱后不产生涡,流体不会从圆柱壁面脱落,当雷诺数大于 2 时,圆柱后缘附近出现一对关于 $Y=0$ 平面对称的涡,当雷诺数大于 40 时,涡开始变得不稳定。而在蠕虫状胶束流体中,即使在很小的雷诺数下,产生了不稳定的涡。KHAN 等[18]也发现了在低雷诺数($Re\sim10^{-6}$)和中等维森贝格数($Wi\sim2.5$)下,胶束断裂因子 $\xi=0.1$ ($\chi=0.26$)时圆柱后缘表面附近出现了一对对称涡,但是涡的大小和形态保持稳定,当 $\xi=0.1$ 时,并未出现流场的非稳态波动,因此涡的形态和大小也不变,当 ξ 减小至 0.01 时,出现流场的拟周期变化,涡的形态和大小也随之发生变化,这与本研究模拟结果基本一致。ξ 表征长胶束链断裂的非线性效应大小,ξ 越小,胶束拉伸应力对弹性响应的非线性效应越显著,越容易出现流动不稳定,流场的不稳定导致涡的形态和大小随时间变化,ξ 越大,胶束拉伸应力对弹性响应的非线性效应越弱,越不容易发生流动不稳定,当 ξ 较大时,流动呈稳态,涡的大小和形态也不随时间变化。

此外文献中采用 Oldroyd-B 和 Giesekus 等本构模型时,并未发现在低雷诺数时的流场不稳定现象[27,35],而 OLIVEIRA 等[38]采用 FENE-CR 本构模型研究圆柱绕流时发现,完全忽略惯性效应,当 De 大于 1.3 时,圆柱后缘发现了形态和大小周期性变化的涡,而本研究得到的流场波动具有拟周期性,并且当拉伸应力随弹性变化的非线性较强时,波动非周期性增强,采用与 OLIVEIRA 等[38]同样的流变参数求解其流变曲线,发现 Wi 从 $0.1\ s^{-1}$ 增加至 $1\ s^{-1}$,拉伸黏度增大了 50 倍以上,拉伸应力随弹性出现较强的非线性变化趋势,而剪切应力随弹性呈线性变化,因此进一步说明拉伸应力随弹性变化的强非线性效应导致流动不稳定现象的发生,并且由于 ξ 足够小时 VCM 模型拉伸应力随弹性变化的非线性比 FENE-CR 模型更强,流场波动的幅度较大,并且波动非周期性更强。

3　结　论

采用双组分 VCM 黏弹性流体本构方程描述蠕虫状胶束溶液的黏弹性和胶束链断裂,研究了其绕圆柱流动时流动状态以及流变参数对流动不稳定性的影响。结论如下。

1)低雷诺数蠕虫状胶束溶液圆柱绕流中,在中等维森贝格数下可能发生流动不稳定,流动完全由弹性主导或者黏性主导时均不会出现流动不稳定现象。

2)在低雷诺数下,圆柱后缘发生流动分离,出现一对周期性变化的对称涡,说明流体弹性会促进流动分离和流动不稳定的发生,流动分离是由黏弹性胶束链的向列分布结构和尾迹区的强拉伸共同作用引起。

3)流体拉伸应力对弹性的强非线性响应是导致流场不稳定的根本原因,拉伸应力随弹性变化的非线性效应较弱时,速度场呈稳定状态,拉伸应力随弹性变化的非线性较强时,出现流场的不稳定,拉伸应力随弹性变化的非线性越强,速度场波动不规则性越显著。

参考文献:

[1]　KIANINEJAD A, SAIDIAN M, MAVADDAT M, et al. Worm-like micelles: a new approach for heavy oil recovery from fractured systems[J]. The Canadian journal of chemical engineering, 2015, 93(5): 951-958.

[2]　ZHAO Y, CHEUNG P, SHEN A Q. Microfluidic flows of wormlike

micellar solutions[J]. Advances in colloid and interface science, 2014,211:34-46.

[3] WANG Z G, WANG S Z, XU L, et al. Extremely slow settling behavior of particles in dilute wormlike micellar fluid with broad spectrum of relaxation times[J]. Journal of dispersion science and technology, 2020, 41(5):639-647.

[4] DREISS C A, FENG Y J. Wormlike micelles: advances in systems, characterisation and applications[M]. United Kingdom: Royal Society of Chemistry, 2017.

[5] 蔡伟华,李小斌,张红娜,等. 黏弹性流体动力学[M]. 北京:科学出版社,2016.

[6] 魏进家,黄崇海,徐娜. 表面活性剂湍流减阻研究进展[J]. 化工进展,2016,35(6):1660-1675.
WEI Jinjia, HUANG Chonghai, XU Na. Research progress concerning turbulent drag reduction of surfactant solution[J]. Chemical industry and engineering progress, 2016, 35(6):1660-1675(in Chinese).

[7] CAIAZZA C, PREZIOSI V, TOMAIUOLO G, et al. Flow-induced concentration gradients in shear-banding of branched wormlike micellar solutions[J]. Journal of colloid and interface science, 2019, 534:695-703.

[8] 苏晓辉,张弛,徐志锋,等. 黏弹性表面活性剂溶液中颗粒沉降特性研究[J]. 化工学报,2022,73(5):1974-1985.
SU Xiaohui, ZHANG Chi, XU Zhifeng, et al. Study on particle settling behavior in viscoelastic surfactant solutions[J]. CIESC journal, 2022, 73(5):1974-1985(in Chinese).

[9] ROTHSTEIN J P, MOHAMMADIGOUSHKI H. Complex flows of viscoelastic wormlike micelle solutions[J]. Journal of non-newtonian fluid mechanics, 2020, 285:104382.

[10] KALB A, VILLASMIL U L A, CROMER M. Role of chain scission in cross-slot flow of wormlike micellar solutions[J]. Physical review fluids, 2017, 2(7):071301.

[11] VASQUEZ P A, MCKINLEY G H, PAMELA COOK L. A network scission model for wormlike micellar solutions: I. Model formulation and viscometric flow predictions[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics, 2007, 144(2/3):122-139.

[12] OMIDVAR R, WU S J, MOHAMMADIGOUSHKI H. Detecting wormlike micellar microstructure using extensional rheology[J]. Journal of rheology, 2019, 63(1):33-44.

[13] OMIDVAR R, DALILI A, MIR A, et al. Exploring sensitivity of the extensional flow to wormlike micellar structure[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics, 2018, 252:48-56.

[14] SACHSENHEIMER D, OELSCHLAEGER C, MÜLLER S, et al. Elongational deformation of wormlike micellar solutions[J]. Journal of rheology, 2014, 58(6):2017-2042.

[15] ZHANG Y R, MULLER S J. Unsteady sedimentation of a sphere in wormlike micellar fluids[J]. Physical review fluids, 2018, 3(4):043301.

[16] 王治国,王树众,孙晓,等. OTAC/NaSal 虫状胶束流体微观结构与线性黏弹性[J]. 力学学报,2013,45(6):854-860.
WANG Zhiguo, WANG Shuzhong, SUN Xiao, et al. The microsturcture and linear viscoelasticity of OTAC/NaSal wormlike micelles[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2013, 45(6):854-860(in Chinese).

[17] FENG Y J, CHU Z L, DREISS C A. Smart wormlike micelles: design, characteristics and applications[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015.

[18] KHAN M B, SASMAL C. Effect of chain scission on flow characteristics of wormlike micellar solutions past a confined microfluidic cylinder: a numerical analysis[J]. Soft matter, 2020, 16(22): 5261-5272.

[19] SASMAL C. Unsteady motion past a sphere translating steadily in wormlike micellar solutions: a numerical analysis[J]. Journal of fluid mechanics, 2021, 912:A52.

[20] DEY A A, MODARRES-SADEGHI Y, ROTHSTEIN J P. Viscoelastic fluid-structure interactions between a flexible cylinder and wormlike micelle solution[J]. Physical review fluids, 2018, 3(6):063301.

[21] MOSS G R, ROTHSTEIN J P. Flow of wormlike micelle solutions through a periodic array of cylinders[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics, 2010, 165(1/2):1-13.

[22] SUN C L, HUANG H Y. Measurements of flow-induced birefringence in microfluidics[J]. Biomicrofluidics, 2016, 10(1): 011903.

[23] ZHAO Y, SHEN A Q, HAWARD S J. Flow of wormlike micellar solutions around confined microfluidic cylinders[J]. Soft matter, 2016, 12(42):8666-8681.

[24] HAWARD S J, KITAJIMA N, TODA-PETERS K, et al. Flow of wormlike micellar solutions around microfluidic cylinders with high aspect ratio and low blockage ratio[J]. Soft matter, 2019, 15(9): 1927-1941.

[25] JAYARAMAN A, BELMONTE A. Oscillations of a solid sphere falling through a wormlike micellar fluid[J]. Physical review E, 2003, 67(6):065301.

[26] CHEN S, ROTHSTEIN J P. Flow of a wormlike micelle solution past a falling sphere[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics, 2004, 116(2/3):205-234.

[27] SU X H, XU Z F, WANG Z G, et al. Data-driven closure model for the drag coefficient of the creeping flow past a translating sphere in a shear-thinning viscoelastic fluid[J]. Powder technology, 2022, 400:117266.

[28] QIN B Y, SALIPANTE P F, HUDSON S D, et al. Upstream vortex

and elastic wave in the viscoelastic flow around a confined cylinder [J]. Journal of fluid mechanics,2019,864:R2.

[29] RIBEIRO V M,COELHO P M,PINHO F T,et al. Viscoelastic fluid flow past a confined cylinder:three-dimensional effects and stability [J]. Chemical engineering science,2014,111:364-380.

[30] FERNANDES C,ARAUJO M S B,FERRÁS L L,et al. Improved both sides diffusion (iBSD):a new and straightforward stabilization approach for viscoelastic fluid flows[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics,2017,249:63-78.

[31] CHOI Y J,HULSEN M A,MEIJER H E H. Simulation of the flow of a viscoelastic fluid around a stationary cylinder using an extended finite element method [J]. Computers & fluids, 2012, 57: 183-194.

[32] RICHTER D,IACCARINO G,SHAQFEH E S G. Simulations of three-dimensional viscoelastic flows past a circular cylinder at moderate Reynolds numbers[J]. Journal of fluid mechanics,2010, 651:415-442.

[33] 王治国,张恒,蔺靖杰,等. 表面活性剂虫状胶束流体中颗粒沉降负尾迹模拟[J]. 过程工程学报,2020,20(6):638-645.
WANG Zhiguo,ZHANG Heng,LIN Jingjie,et al. Simulation of negative wake of particle settling in surfactant wormlike micellar fluid [J]. The Chinese journal of process engineering,2020,20(6): 638-645(in Chinese).

[34] 王治国,蔺靖杰,刘凯,等. 表面活性剂流体弹性应力对颗粒沉降的影响[J]. 应用力学学报,2021,38(4):1415-1422.
WANG Zhiguo,LIN Jingjie,LIU Kai,et al. Effect of elastic stress of viscoelastic surfactant fluid on particle sedimentation[J]. Chinese journal of applied mechanics,2021,38(4):1415-1422(in Chinese).

[35] PENG S,LI J Y,XIONG Y L,et al. Numerical simulation of two-dimensional unsteady Giesekus flow over a circular cylinder[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics,2021,294:104571.

[36] PIPE C J,KIM N J,VASQUEZ P A,et al. Wormlike micellar solutions:II. Comparison between experimental data and scission model predictions[J]. Journal of rheology,2010,54(4):881-913.

[37] ZHOU L,MCKINLEY G H,COOK L P. Wormlike micellar solutions:III. VCM model predictions in steady and transient shearing flows[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics,2014,211: 70-83.

[38] OLIVEIRA P J,MIRANDA A I P. A numerical study of steady and unsteady viscoelastic flow past bounded cylinders[J]. Journal of non-Newtonian fluid mechanics,2005,127(1):51-66.

（编辑　张璐）